

地震作用下岩盐层套管变形规律研究

伍开松¹, 罗进军¹, 张庆生², 荣 明¹

(1. 西南石油大学, 成都 610500; 2. 中原油田普光分公司, 达州 635000)

摘 要: 5.12 汶川特大地震发生后, 某气田在岩盐层段发现了多口井套管变, 为了能有效地治理, 急需了解其套管变的原因和规律。为此, 利用真三维接触有限元分析方法研究了震前套管应力和变形分布规律, 并在原有边界条件基础上, 在模型的顶面进一步施加不同震级地震载荷, 重新分析套管应力和变形的分布规律。对比二者分析的结果发现: 无论是震前还是震后都显示岩盐层段套管的应力和变形水平明显高于套管其他部位, 且基本规律是震级越高套管在岩盐层段的应力水平和变形越大。对比有限元计算震前和震后套管应力和变形的结果还发现, 仅 5.12 特大地震载荷的竖向分量所产生的应力水平已经超过了套管的屈服强度极限, 因此, 可以判定此次地震是导致该气田盐岩层段出现套变的真正原因。

关 键 词: 套管; 变形; 地震; 岩盐; 有限元分析

中图分类号: TE 31

文献标识码: A

Study of casing deformation in halite bed under earthquake

WU Kai-song¹, LUO Jin-jun¹, ZHANG Qing-sheng², RONG Ming¹

(1. Southwest Petroleum University, Chengdu 610500, China; 2. Puguang Branch, Zhongyuan Petroleum Company, Dazhou 635000, China)

Abstract: Casing deformation and damage have been found in halite beds in many gas wells of a gas field after 5.12 Wenchuan Earthquakes. It is very important to find out the reasons and laws of the casing deformation in order to control and repair them. Distribution laws of the casing stress and deformation are found out by applying true three-dimensional contact finite element analysis before the earthquake. Based on the above, applying extra different earthquake loads to top face of the model, the casing stress and deformation are studied again. Careful contrast of the two results shows that the level of casing stress and deformation is higher in halite bed than that in other beds whether before or after earthquakes; and the basic laws are that the higher earthquake power is, the higher level of casing stress and deformation is in halite bed. Finite element calculation results also reveal that 5.12 Wenchuan Earthquakes are the direct reasons for casing deformation and damage because the Mises stress of the casing in halite bed is already over the yield limit of its material only under the influence of vertical component load of 5.12 Wenchuan Earthquakes.

Key words: casing; deformation; earthquake; halite; finite element analysis

1 引 言

地震伴随着强大的能量释放, 引起大范围的构造应力场的变化, 这种变化形成了巨大的“地震载荷”施加给油气井套管, 造成套管的非正常损坏^[1]。某气田距离 5.12 汶川特大地震活动断裂带约 260 km, 处于地震强烈影响场的范围。5.12 汶川特大地震发生后, 该气田在多口井发现了不同程度的套管变形, 通过测井发现套管变形段都发生在岩盐层。国内外石油工作者对套管损坏做了深入研

究^[2-5], 但地震作用下套管损坏只有一些定性研究, 在地震作用下, 盐岩层段套管变形失效研究十分少见, 为了弄清地震载荷作用下岩盐层套管变形失效规律, 为套管变井的治理和后续开发井的套管强度设计提供理论依据, 本文进行了地震载荷作用下岩盐层段套管变形失效规律研究。

2 震前套管应力场有限元分析

2.1 三维有限元几何模型

油气井固井后, 在井下几千米深处, 套管、水泥

环与岩石紧密结合在一起,与大地构成一个整体。为了研究方便,真三维有限元几何模型取变形井段的岩盐层及其上下两层的膏岩、水泥环和套管。假设不考虑井眼轨迹,即套管在井眼中没有弯曲,且同一种岩石在 X 、 Y 、 Z 3 个方向上的弹性模量相同。本文以某气田 102 井为实例,其几何模型如图 1 所示。按照真三维套管-水泥环-岩层系统力学模型建模方法建立几何模型^[6],上层为膏岩,中间为岩盐,下层为膏岩,中间为水泥环和套管模型。

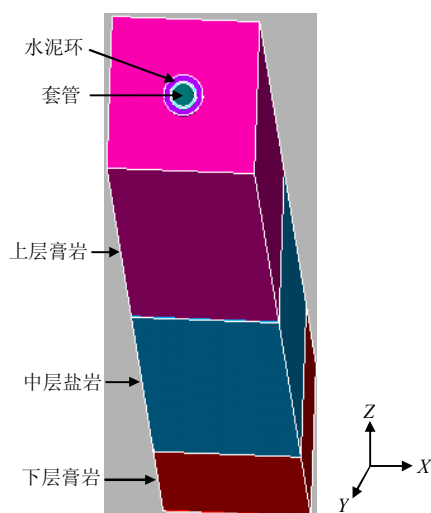


图 1 真三维套管-水泥环-岩层几何模型
Fig.1 True 3D tube-cement loop-rock system
geometric model

2.2 边界条件的施加

地应力的研究是每个油田必须的研究工作。在进行真三维套管-水泥环-岩层系统有限元分析时,可以借用地应力的研究成果来确定有限元分析的边界条件。如图 1 中的坐标系所示, XY 平面平行于模型底面, Z 轴平行套管轴向。根据真三维套管-水泥环-岩层系统所处的地应力环境,可以对真三维套管-水泥环-岩层系统施加如下的边界条件:设真三维套管、水泥环和岩层系统模型底面固定不动,即施加固定约束条件。对模型 X 方向施加最大水平主应力、 Y 方向施加水平最小主应力。在 Z 方向对模型顶面施加垂向主应力。

2.3 材料基本参数

通过一系列室内材料力学特性实验测试和现场测井资料的解释,可以得到套管、水泥环、岩石的基本力学参数如下: P110 套管钢材,弹性模量 2.1×10^5 MPa; 泊松比 0.3; 屈服极限 890 MPa; 切

变模量 79 GPa。水泥环弹性模量 2×10^4 MPa; 泊松比 0.25。上层膏岩弹性模量 7.3×10^4 MPa; 泊松比 0.28; 内聚力 3.4 MPa; 内摩擦角 33° 。中层岩盐弹性模量 4.9×10^4 MPa; 泊松比 0.24; 内聚力 2.1 MPa; 内摩擦角 35° 。下层膏岩弹性模量 10.3×10^4 MPa; 泊松比 0.3; 内聚力 4.1 MPa; 内摩擦 32° 。

2.4 震前真三维套管应力场结果分析

为了使真三维套变系统接触有限元分析的不同材料之间能够有机的衔接,套管材料单元选择了 ANSYS 的 SOLID45 作为其基础体单元,岩层和水泥环选择 SOLID65 体单元。套管采用双线性弹塑性材料本构模型,岩石和水泥环采用 Drucker-Prager 弹塑性材料本构模型。震前套管的应力大小及其分布规律如图 2 所示。

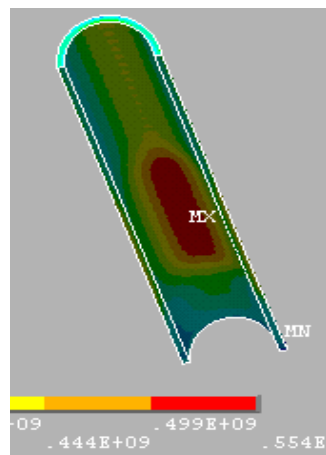


图 2 震前套管应力云图
Fig.2 Casing stress nephogram before earthquake

根据图 2 的套管应力云图可以看出岩盐层段的套管应力水平明显高于套管的其他部位,最大应力位于岩盐层段套管的内壁,最大应力值为 554 MPa,外圈水泥环的最大应力低于强度极限。说明地震前套管在岩盐层段就已经有较高的应力水平,但是应力值低于套管材料的屈服极限,尚处于弹性变形范围内。

3 地震作用下三维套变力学模型

地震是一种常见的危害极大的自然现象。地震过程中地面晃动现象的实质,是地震作用所激发的地震波传播到达地表面所致。地震发生时首先出现是 P 波,导致铅垂方向的岩层上下振动(竖向地震)^[7]。本文只考虑套管在竖向地震作用下的套管

变形规律。在汶川主震和多次余震载荷作用下，各层岩石之间变形不协调，岩层与水泥环、套管之间变形不协调，由于变形不协调，必然给套管带来附加载荷。

根据文献[7]竖向地震加速度峰值约为横震动的 $1/2 \sim 2/3$ ，某气田处于汶川地震烈度分布的VI烈度区，相当于5级地震破坏能量^[8]，根据震级与振幅的关系式可知，该地区的最大水平振幅100 mm，竖向最大振幅范围为50~66 mm之间。为计算方便，本文取竖向加速度峰值为横震的 $1/2$ ，所以本文取竖向振幅的最大值为50 mm。地震台记录到的地震波都是加速度时程曲线，由于模型太大，为了提高计算效率，取一个周期的加速度曲线进行计算，假设加速度曲线满足正弦规律。把作用在模型上的加速度曲线通过积分转化成位移载荷作用在模型上。

对地震作用下的三维套管力学模型施加如下边界：固定模型底面，周围施加水平地应力，顶面岩石受到上覆岩层压力，同时地震载荷以正弦位移的形式作用在模型顶面。

4 地震作用套管应力有限元分析

在震前有限元分析结果基础上，施加地震载荷在模型顶面。地震载荷的振幅分别为10、20、30、40、50 mm，分别相当于4.3级、4.6级、4.77级、4.9、5.0级地震，周期为1 s，利用ANSYS软件研究不同地震级别下套管的应力变化规律。套管的应力分析结果如下。

从图3~7的套管应力云图看出，在受到振幅4.3级地震载荷时，套管应力最大值上升到675 MPa，4.6级地震载荷时，套管应力最大值上升到759 MPa，4.77级地震载荷时，套管应力最大值

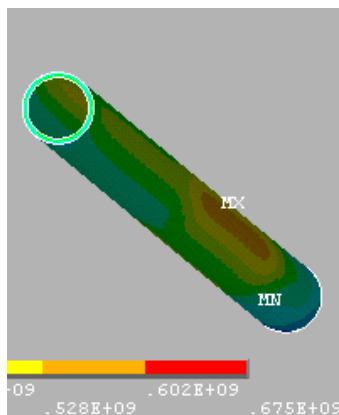


图3 4.3级地震作用下套管的应力云图
Fig.3 Casing stress nephogram under 4.3 earthquake

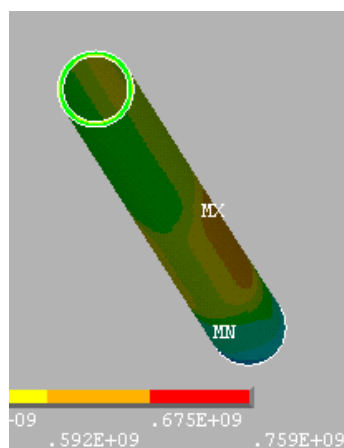


图4 4.6级地震作用下套管的应力云图
Fig.4 Casing stress nephogram under 4.6 earthquake

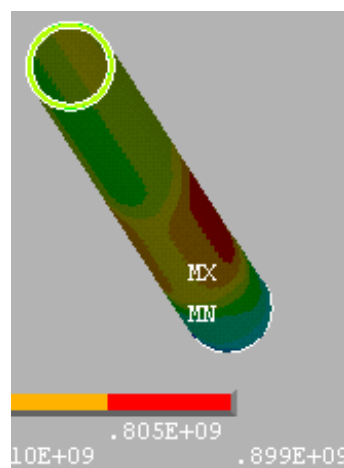


图5 4.77级地震作用下套管的应力云图
Fig.5 Casing stress nephogram under 4.77 earthquake

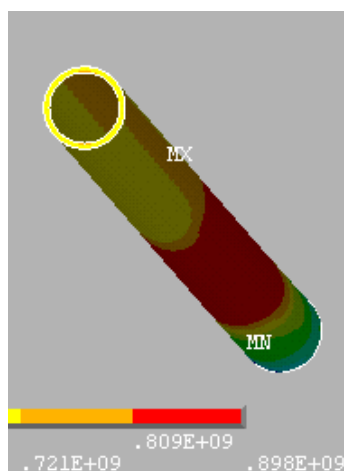


图6 4.9级地震作用下套管的应力云图
Fig.6 Casing stress nephogram under 4.9 earthquake

上升到899 MPa，4.9级地震载荷时，套管应力最大值为898 MPa，5.0级地震载荷时，套管应力最大值为895 MPa。

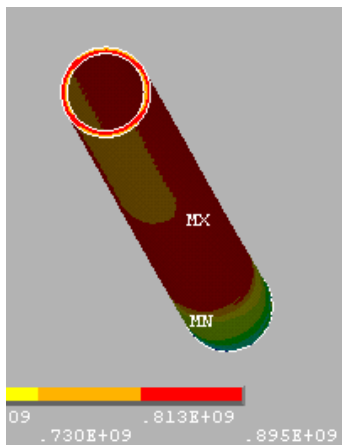


图 7 5.0 级地震作用下套管的应力云图

Fig.7 Casing stress nephogram under 5.0 earthquake

5 套管应力与震级关系

为了观察和研究在不同震级作用下, 套管的最大 Mises 与震级之间的关系, 绘制了震级-套管最大 Mises 应力曲线, 如图 8 所示。

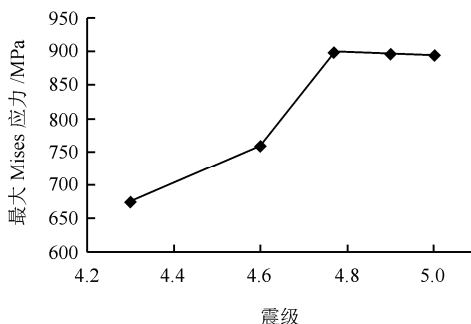


图 8 震级-套管最大 Mises 应力曲线

Fig.8 Curve of seismic level-casing's maximum stress

从图 8 中可以看出, 震级<4.77 时, 套管的最大 Mises 应力小于套管的屈服极限, 处于弹性范围, 套管的应力随震级的增加而不断增大。当震级超过 4.77 时, 套管应力超过屈服极限, 进入塑性变形阶段, 这时随震级的增加, 应力几乎不再变化。某气田处于汶川地震烈度分布的 VI 度区, 相当于 5 级地震破坏能量。由此说明该气田的套管仅在地震载荷竖向分量的作用下就会发生塑性变形。

有限元分析结果证明套管在承受地震竖向载荷带来的轴向力和变形不协调产生的附加轴向载荷作用下会达到屈服极限, 产生塑性变形。本文只考虑了地震竖向分量载荷, 所以套管是受到过大的轴向载荷而产生的塑性变形。

6 结 论

应用真三维接触有限元仿真分析方法, 研究了震前和地震作用下某气田 102 井的套管应力和变形的变化规律。分析结果表明:

(1) 无论震前还是地震载荷作用下, 套管在岩盐层段的应力水平明显高于其他部位, 表明岩盐层容易发生套管变形和损坏。

(2) 某气田处于汶川地震烈度分布的 VI 度区, 相当于 5 级地震破坏能量。有限元分析表明仅在 4.77 级地震的竖向分量载荷作用下套管就已经发生塑性变形。由此说明地震是导致该气田套变的直接原因。如果考虑竖向和横向地震载荷同时作用套管, 套管的变形会更严重。

参 考 文 献

- [1] 刘子晋. 地震与油田工程的探讨[J]. 东北地震研究, 1989, 5(2): 16—20.
- [2] 曾德智, 林元华. 深井岩盐层套管外载的三维有限元分析[J]. 石油钻采工艺, 2007, 29(2): 50—60.
- [3] 王金龙, 闫相祯, 杨秀娟. 疏松砂岩地层套管应力变化三维仿真分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(11): 1884—1889.
- [4] HAN J Z, SHI T H. Equations calculate pressures for casing strings[J]. *Oil and Gas Journal*, 2001.
- [5] KING G E. The effect of high-density perforating on the mechanical crush resistance of casing, SPE1884, 1989.
- [6] 伍开松, 罗进军. 真三维套管-水泥环-岩层系统力学模型研究[J]. 石油机械, 2008, (1): 12—14.
- [7] 钱培风. 竖向地震力和抗震砌块建筑[M]. 北京: 中国大地出版社, 1997.
- [8] 沈聚敏. 抗震工程学[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2000.